Environnement Canada | Environment Canada
Service canadien des forêts | Canadian Forestry Service

ASPECTS PRATIQUES DE LA MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE LINÉAIRE

C. E. Van Wagner

Rapport d'information PI—X—12(F)

ISSN 0228-0736

ASPECTS PRATIQUES DE LA MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE LINÉAIRE

C. E. Van Wagner

Institut forestier national de Petawawa
Service canadien des forêts
Chalk River (Ontario) Canada

Rapport d'information PI-X-12(F)

1982

Publication autorisée par le ministre,
Environnement Canada

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1982
N° de catalogue Fo46-11/12-1982F
ISSN 0228-0736
ISBN 0-662-91632-8

Des exemplaires de cette publication
peuvent être obtenus à l'adresse suivante:

Centre de distribution des publications
Institut forestier national de Petawawa
Environnement Canada
Chalk River (Ontario)
K0J 1J0

Ce rapport était publié originalement en anglais
sous le titre Practical Aspects of the Line
Intersect Method.

The original version of this publication is available
in English under the title Practical Aspects of the
Line Intersect Method.

Table des matières

1		Résumé/Abstract
1		Introduction
2	I.	Nature de la méthode d'échantillonnage linéaire
2	II.	Équations spécifiques de volume et de masse
3	III.	Orientation des pièces et configuration d'échantillonnage
4	IV.	Inclinaison des pièces et pente du terrain
5	V.	Conicité des pièces et forme des sections
5	VI.	Limites et centres des catégories de diamètre
7	VII.	Longueur d'un réseau ou longueur totale des pièces
7	VIII.	Distribution de la longueur des pièces
8	IX.	Taille et précision de l'échantillon
10	X.	Nom de la méthode
11	XI.	Choix du diamètre
11		Conclusion
12		Bibliographie
3		Tableau 1. Constante k de l'équation d'échantillonnage linéaire pour certaines unités de longueur, de volume, et de masse

ASPECTS PRATIQUES DE LA MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE LINÉAIRE

Résumé

Ce rapport présente des informations et des commentaires sur de multiples aspects pratiques de la méthode d'échantillonnage linéaire, comme les équations spécifiques du volume et du poids pour diverses séries d'unités, les problèmes relatifs aux écarts d'orientation et au relevé des échantillons, les limites et les centres des classes de diamètre, l'application de la méthode à la détermination de la longueur totale des parties ou des réseaux et la répartition de la longueur des parties, la taille des échantillons, la longueur de la ligne, la précision et bien d'autres encore. Ce document ne constitue pas une revue exhaustive de la documentation sur la méthode d'échantillonnage linéaire ni n'introduit une nouvelle théorie. Il est plutôt une compilation des idées qui se trouvent éparpillées dans les divers documents existants sur l'application pratique de cette méthode.

Abstract

This report provides information and comment on a number of practical aspects of the line intersect method, including specific equations for volume and weight for various sets of units; problems of orientation bias and sample layout; diameter-class limits and centres; use of the method to determine total length of pieces or networks and piece-length distribution; sample size, length of line, and precision; and others. The report is not a complete review of line intersect literature, nor does it present new theory. It does bring together in one place ideas on the practical application of the method that are presently scattered throughout the literature.

Introduction

Depuis sa première description par Warren et Olsen (1964), la méthode de l'échantillonnage linéaire a été très utilisée pour mesurer la quantité de bois se trouvant au sol ou à proximité. La première application, qui consistait à évaluer les résidus d'abattage, a été perfectionnée par Bailey (1970). Van Wagner (1968) et Brown (1971) ont décrit l'application de cette méthode à la mesure des combustibles forestiers. De Vries (1973) a étudié en profondeur ses fondements mathématiques et Pickford et Hazard (1978) ont exécuté une série d'études de simulation. Enfin, la bibliographie fait état de nombreuses autres applications particulières. Bien que le principe théorique de cette méthode soit simple, son application pose de nombreuses questions. L'objectif de ce rapport est de présenter sous une forme concise un certain nombre des aspects pratiques de la méthode d'échantillonnage linéaire. Il ne s'agit pas d'une étude classique de la bibliographie, ni de la présentation d'une nouvelle théorie. Notre propos èst plutôt de combler une lacune entre la théorie et la pratique, ainsi que de faciliter une compréhension aussi bonne que possible de la méthode. Brown (1974) et McRae et al. (1979) ont donné des indications détaillées pour l'application concrète de la méthode sur le terrain et leurs conclusions ne sont donc pas reprises ici.

L'auteur remercie Duncan A. MacLeod, Direction des systèmes et de l'analyse des données, Direction générale de l'informatique et de la statistique appliquée, Environnement Canada, Ottawa, de

Approbation du manuscrit pour publication: Septembre 1980.

C.E. Van Wagner est un chercheur de l'Institut forestier national de Petawawa.

l'aide qu'il lui a apportée pour les aspects mathématiques et statistiques de ce rapport.

I. Nature de la méthode d'échantillonnage linéaire

Le meilleur moyen de décrire la méthode d'échantillonnage linéaire est de dire qu'il s'agit d'un échantillon en bande de largeur infinitésimale. Les données recueillies sont les diamètres des pièces de bois aux points où elles coupent la ligne d'échantillonnage. Cette ligne est en fait un plan vertical et le décompte porte sur une série de sections circulaires des pièces de bois traversées par le plan. Naturellement, les sections réelles sont en fait des ellipses de formes diverses (sauf lorsque le plan d'intersection est exactement à angle droit) mais, pour plus de commodité, un facteur obtenu d'après la théorie des probabilités permet de considérer les sections comme des cercles. La somme des sections est alors divisée par la longueur de la ligne d'échantillonnage. Le résultat ainsi obtenu est exprimé en surface de sections par unité de longueur de la ligne d'échantillonnage. Si l'on multiplie le numérateur et la dénominateur par la largeur, on transforme la ligne d'échantillonnage en bande d'échantillonnage (Van Wagner et Wilson 1976) et le résultat peut alors être exprimé en volume par unité de surface de sol. Ce volume peut à son tour être facilement converti en masse. L'équation fondamentale (Van Wagner 1968) est la suivante:

$$V = (\pi^2/8L)\ \Sigma\, d^2 \qquad (1)$$

où V est le volume par unité de surface,
d est le diamètre de la pièce au point d'intersection,
L est la longueur de la ligne d'échantillonnage.

La quantité $\pi^2/8$ est le produit de deux termes: $\pi/2$, le facteur de probabilité mentionné plus haut, et $\pi/4$, le facteur nécessaire pour transformer d^2 en une surface circulaire. Cette équation repose sur trois hypothèses, à savoir que l'orientation des pièces est au hasard, que la section des pièces est circulaire et que les pièces sont horizontales. Nous reviendrons sur ces hypothèses un peu plus tard.

Multiplié par la masse spécifique du bois, le volume est converti en masse. L'équation de base est transformée comme suit:

$$W = (S\,\pi^2/8L)\ \Sigma\, d^2 \qquad (2)$$

où W est la masse par unité de surface de sol et S est la densité, en unités de masse par unité de volume.

L'une des conséquences de la méthode de la bande d'échantillonnage est que la longueur des pièces n'a pas d'importance. De plus, chaque intersection constitue un événement qu'il faut compter, quelles que soient ses relations spatiales d'un côté ou de l'autre de la ligne d'échantillonnage.

II. Équations spécifiques de volume et de masse

Les équations de base ne peuvent être utilisées directement que si toutes les quantités sont exprimées en unités compatibles. En pratique, il n'en est généralement pas ainsi. Chaque équation spécifique est donc assortie d'une constante particulière qui incorpore $\pi^2/8$ plus les facteurs de conversion.

L'équation de base pour la masse repose sur le simple fait que le volume multiplié par la densité est égal à la masse. Mais il est plus commode en pratique d'utiliser le poids spécifique au lieu de la densité. La constante de l'équation doit donc comprendre la densité de l'eau dans les unités voulues de masse et de volume. Les formes générales des équations utilisées en pratique sont les suivantes:

$$V = (k/L)\ \Sigma\, d^2 \qquad (3)$$

pour le volume par unité de surface et

$$W = (G\,k/L)\ \Sigma\, d^2 \qquad (4)$$

pour la masse par unité de surface,

où G est le poids spécifique et k la constante de l'équation.

Le tableau 1 donne les valeurs de k pour certaines combinaisons d'unités.

Tableau 1. Constante k de l'équation d'échantillonnage linéaire pour certaines unités de longueur, de volume, et de masse

Combinaisons d'unités				k
d	L	V	W	
cm	m	m^3/m^2		0,0001234
cm	m	m^3/ha		1,234
cm	m		kg/m^2	0,1234
cm	m		t/ha	1,234
in	ft	ft^3/ft^2		0,008567
in	ft	ft^3/ac		373,3
in	ft		lb/ft^2	0,5348
in	ft		T/ac	11,65

Remarque: La signification des symboles est donnée dans le texte.

III. Orientation des pièces et configuration d'échantillonnage

L'équation de base suppose que les pièces de l'échantillon sont orientées de façon aléatoire, tous les angles étant également représentés. Dans une population idéale de ce type, une ligne d'échantillonnage donnera un résultat sans distorsion, quelle que soit son orientation. Les arbres abattus par le vent et certains types d'opérations d'abattage peuvent entraîner une distorsion spatiale, en ce sens que les pièces sont alignées davantage dans une direction que dans les autres. Cependant, puisque la distorsion spatiale peut facilement être neutralisée, il est logique de choisir l'échantillon de façon à s'en prémunir. On obtient ce résultat en prenant plusieurs axes d'échantillonnage et en faisant la moyenne des résultats.

La méthode de Brown (1974) consiste à choisir au hasard une direction sur six axes orientés à 30 degrés les uns des autres pour le point de départ de chaque ligne. Cette solution est parfaitement satisfaisante. Une autre option consiste à calculer le maximum de distorsion possible qui peut résulter de diverses combinaisons d'axes d'échantillonnage, puis à adopter une configuration qui maintiendra dans une limite raisonnable l'erreur maximale possible.

On démontre (Van Wagner 1968) que l'erreur maximale possible résultant de la distorsion spatiale est de 21 pour cent pour deux lignes perpendiculaires et de 9 pour cent pour trois lignes à 60 degrés d'intervalle. Ces erreurs maximales ne sont naturellement possibles que si toutes les pièces sont alignées dans la même direction et, même ainsi, uniquement lorsque la configuration des lignes d'échantillonnage est orientée dans la direction la plus défavorable - situation extrêmement peu probable. Il semble donc qu'on peut se prémunir suffisamment contre la distorsion spatiale avec une configuration à trois axes qui est tout aussi facile à utiliser qu'une configuration à deux axes et qui n'oblige pas à choisir une orientation particulière au début de chaque ligne d'échantillonnage. La figure la plus commode sur le terrain est celle du triangle équilatéral.

Pour obtenir une efficacité

maximale de l'échantillonnage linéaire sur le terrain, trois facteurs doivent être réduits au minimum:

a. La distance qui l'observateur doit parcourir à pied, en plus de l'échantillonnage proprement dit
b. Les longueurs mesurées, en plus des lignes d'échantillonnage
c. Le nombre des points de départ à repérer

Les triangles équilatéraux présentent les avantages suivants:

1. Ils peuvent être de n'importe quelle taille et on peut les utiliser en n'importe quel nombre.
2. Un seul triangle équilatéral suffit à obtenir un niveau de protection contre la distorsion spatiale qu'on ne pourrait atteindre qu'avec un nombre considérable de lignes d'échantillonnage aléatoires.
3. Les points de départ peuvent etre repérés sans arpentage précis, c'est-à-dire que les seules distances mesurées seront les lignes d'échantillonnage proprement dites.
4. La direction initiale peut être choisie au hasard ou orientée délibérément de façon à atténuer une distorsion spatiale évidente. Voir figure 2 de Van Wagner (1968).
5. Il n'est pas nécessaire que le triangle soit exactement fermé, pour autant que les longueurs des côtés soient mesurées avec précision.

Pour les applications sur le terrain, la configuration sans distorsion la plus commode est une grille mécanique que l'on superpose sur la carte. L'observateur peut localiser les points de départ au sol en comptant ses pas ou par rapport à des repères identifiables. L'orientation des lignes ou des triangles peut être établie à l'avance ou sur place, au moyen d'une méthode raisonnable.

IV. Inclinaison des pièces et pente du terrain

L'équation de base suppose que les pièces sont horizontales. Si une pièce est inclinée, les probabilités de son intersection par la ligne d'échantillonnage sont évidemment moindres. Si de nombreuses pièces sont inclinées, les intersection seront moins nombreuses pour un même volume de bois. L'erreur est toujours négative et correspond à 1-cos h, où h est l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale. Par conséquent, le facteur de correction est 1/cos h, ou sec h. Cette erreur est minime aux petits angles puisqu'elle n'est que de 0,4 pour cent à 5 degrés et qu'elle est encore inférieure à 10 pour cent à 25 degrés. Elle se présente surtout lorsque de petites pièces sont attachées à de plus grosses pièces, comme c'est le cas des débris résultant d'un abattage récent.

Il appartient à l'observateur de juger dans chaque cas d'espèce si cette erreur doit être corrigée. Une correction objective nécessiterait un sous-échantillonnage des angles d'inclinaison des pièces. Brown et Roussopoulos (1974) ont établi des facteurs de correction expérimentaux moyens (c'est-à-dire des sécantes) pour les débris d'abattage de 10 espèces de conifères et d'une espèce d'arbre feuillu. Selon eux, les erreurs dues à l'inclinaison sont en fait significatives et atteignent environ 20 pour cent dans le cas des résidus d'abattage récents (toutes les dimensions jusqu'à 7,6 cm) et 15 pour cent après une ou plusieurs années. Leurs facteurs de correction peuvent être utilisés directement pour les espèces étudiées ou on peut les extrapoler empiriquement pour d'autres espèces semblables.

En ce qui concerne la pente du terrain, le résultat de l'échantillonnage au plan d'intersection peut naturellement être exprimé de deux manières différentes, selon l'utilisation qui sera faite des résultats: (1) surface effective du sol (pour l'évaluation du comportement de la zone en cas d'incendie par exemple), ou (2) surface cartographique horizontale (pour les inventaires de résidus par exemple). En tout état de cause, il est plus facile de mesurer la ligne d'échantillonnage sur la surface réelle du sol et de noter la pente du terrain. Si l'on désire obtenir le volume ou la masse par unité de surface horizontale, le résultat peut alors être

multiplié, comme dans le cas de l'inclinaison des pièces, par la sécante de l'angle de pente. Brown (1974) donne la formule de correction de la pente du terrain:

Facteur de correction =

$$\sqrt{1 + \left(\frac{\text{pourcentage de pente}}{100}\right)^2} \qquad (5)$$

V. Conicité des pièces et forme des sections

Du fait que la méthode d'échantillonnage linéaire consiste simplement à recueillir un échantillon sans distorsion de sections circulaires à partir de pièces de bois se trouvant à terre, comme si la ligne d'échantillonnage était une bande d'échantillonnage de largeur infinitésimale, on peut en déduire intuitivement que la conicité des pièces ne risque pas d'introduire d'erreur (Van Wagner 1968). Cette conclusion a été confirmée par Pickford et Hazard (1978) dans leurs études de simulation. On peut affirmer sans crainte de se tromper que le résultat de l'échantillonnage linéaire ne dépend aucunement des variations de diamètre constatées sur la longueur des pièces.

Il est cependant évident que des sections non circulaires pourraient introduire une erreur si une seule dimension était mesurée à chaque intersection. La méthode la plus simple pour tenir compte des sections occasionnelles qui ne sont pas de forme circulaire consiste à évaluer un diamètre représentatif à partir de la moyenne de deux mesures. Si l'écart est important, par exemple une section rectangulaire plutôt que circulaire, l'équation elle-même peut être modifiée, comme l'a montré Brown (1971). La mesure dans laquelle il faut tenir compte des sections non circulaires est essentiellement une question de jugement.

VI. Limites et centres des catégories de diamètre

En temps normal, il est tout à fait malaisé et inutile de calculer le diamètre exact de chaque pièce de l'échantillon, particulièrement lorsque le nombre des petites pièces est élevé. Les intersections sont donc décomptées par catégories de diamètres. Le nombre et l'espacement des catégories dépend de l'utilisation qui sera faite de l'échantillonnage. Si l'on s'intéresse surtout à la quantité des petites pièces, on peut alors mesurer approximativement ou ignorer les pièces plus grosses. Par contre, si l'on veut obtenir une évaluation fiable du volume ou de la masse totale, il faut alors porter une attention particulière aux grosses pièces. Par exemple, une erreur de 1 cm dans la mesure d'une pièce de 10 cm équivaut à 20 pièces de 1 cm. Il en résulte que les catégories de diamètres ne doivent pas être élargies avec les augmentations de diamètre, mais bien conserver une largeur constante. Au-dessus d'un certain point, le décompte par catégorie peut être remplacé par la mesure des différentes pièces.

Le groupe de recherche sur les feux de forêt du Service canadien des forêts a adopté les catégories suivantes de diamètres: 0–1, 1–3, 3–5, 5–7 et plus de 7 cm. Ces catégories peuvent d'ailleurs être subdivisées si on le désire. Lorsqu'on veut mettre l'accent sur les petites pièces, la première catégorie peut être divisée en deux. Si on veut une bonne approximation de la masse ou du volume total, la totalité de la plage 0–7 peut être échantillonnée en catégories de 1 cm. Les pièces de plus de 7 cm de diamètre sont généralement mesurées une par une, à 0,1 cm près.

Lorsque les pièces sont décomptées par catégorie, il faut choisir un diamètre moyen approprié pour représenter chacune de ces catégories. Le terme Σd^2 de l'équation 1 devient $\Sigma_i (n_i D_i^2)$ où n_i est le nombre des intersections de la catégorie de diamètre i et D_i le diamètre représentatif de la catégorie. Théoriquement, étant donné que d^2 est la propriété dont on fait la somme, la valeur de la catégorie doit être la moyenne quadratique du diamètre (c'est-à-dire la racine carrée du diamètre moyen au carré), plutôt que le centre arithmétique simple de la catégorie, c'est-à-dire le diamètre moyen.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour faire la moyenne quadratique du diamètre (MQD). L'une d'elles consiste à

procéder à un échantillonnage objectif sur le terrain pour tenir compte de la distribution naturelle des diamètres dans chaque catégorie de la population en cause (Brown et Roussopoulos 1974; Bevins 1978; Sackett 1980). Cette méthode est logique et valide, mais elle suppose deux conditions préalables: (1) il faut procéder à une étude sur le terrain pour chaque espèce différente ou pour chaque type de complexe forestier et (2) la moyenne quadratique ainsi établie ne s'applique qu'à un ensemble de catégories de diamètres et ne peut être adaptée à un autre ensemble (sauf peut-être d'après les données brutes originales).

Une autre méthode consiste à calculer la moyenne quadratique du diamètre d'après la distribution de la fréquence des diamètres au cours du décompte de l'échantillon linéaire,* en prenant pour hypothèse que les fréquences suivent une loi simple du type:

$$y = ax^b \qquad (6)$$

où y est le nombre des intersections par unité de longueur de la ligne d'échantillonnage pour une catégorie de diamètre d'une unité de largeur,
x est le diamètre,
a et b sont des constantes.

La méthode consiste alors à reporter les fréquences ajustées des diamètres sur une échelle logarithmique pour obtenir la valeur de l'exposant b, puis à appliquer la formule

$$(MQD)^2 = \frac{(b+1)\,(x_2^{\,b+3} - x_1^{\,b+3})}{(b+3)\,(x_2^{\,b+1} - x_1^{\,b+1})} \qquad (7)$$

où x_2 et x_1 sont les limites supérieure et inférieure de chaque catégorie de diamètres. Une limite inférieure arbitraire (par exemple 0,1 ou 0,2 cm) doit être utilisée à la place du zéro pour que l'équation puisse s'appliquer à la catégorie inférieure.

Pour déterminer l'exposant b d'un échantillonnage linéaire donné, on procède comme suit:

1. Si des lignes de longueur différente ont été utilisées pour les différentes catégories de diamètres, diviser chaque fréquence par la longueur de sa ligne et multiplier par une longueur commune.
2. Diviser ensuite chaque fréquence par la largeur de sa catégorie (c'est-à-dire, $x_2 - x_1$).
3. Tracer chaque fréquence ajustée en fonction du point médian de sa catégorie sur une échelle logarithmique.
4. Tracer une ligne droite entre ces points et évaluer la pente logarithmique b (toujours une valeur négative). On remarquera que la constante a de l'équation 6 n'est pas nécessaire.
5. S'il est impossible de relier les points par une ligne droite, diviser le graphique en un certain nombre de sections droites et déterminer b pour chacune d'elles.

L'équation 7 présente cependant certaines limites. Elle ne peut être résolue lorsque b est exactement égal à −1 ou −3. Il serait facile d'établir des formules spéciales pour ces cas particuliers, mais il est probablement plus commode de conserver une valeur générale et d'éviter les valeurs exactes de −1 ou −3. Par exemple, les valeurs de −2,99 ou −3,01 donneront des résultats satisfaisants lorsque b=−3. On peut procéder de même lorsque b=−1.

Cette méthode présente les avantages suivants: (a) il n'est plus nécessaire de faire un travail supplémentaire sur le terrain; (b) les MQD sont adaptées à un échantillonnage linéaire particulier et (c) la méthode peut s'appliquer à n'importe quel ensemble de catégories de diamètres.

Sur le plan de la précision, ces MQD calculées devraient toujours donner de meilleurs résultats que des centres arithmétiques simples et elles correspondent relativement bien aux MQD expérimentales. En tout état de cause, si la précision d'un échantillonnage linéaire présente une importance capitale, il est plus logique de décompter un plus grand nombre de catégories de diamètres plus

*Van Wagner, C.E., communication en cours de préparation.

réduites que de consacrer le temps à évaluer plus précisément la moyenne quadratique des diamètres.

VII. Longueur d'un réseau ou longueur totale des pièces

La théorie de l'échantillonnage linéaire peut facilement s'adapter à la mesure de la longueur totale d'un réseau ou d'éléments non connectés se trouvant dans une zone définie. A titre d'exemple, on pourrait donner la longueur d'un réseau de routes ou de rues, la longueur des cours d'eau et des rivières d'un bassin hydrographique, ou la longueur des pièces de bois par unité de surface de sol. Matern (1964) a donné le premier exemple de cette application et Hildebrandt (1973) en a donné un autre. L'évaluation d'une longueur est en fait plus simple que l'évaluation d'un volume, mais le principe de base demeure le même. Matern (1964) donne l'équation suivante:

$$Y = (\pi/2)\ (n/L) \qquad (8)$$

où Y est la longueur du réseau ou de l'élément par unité de surface échantillonnée,

n est le nombre des intersections avec la ou les lignes d'échantillonnage,

L est la longueur de la ligne d'échantillonnage.

Cette formule nous donne la longueur totale par unité de surface en fonction du carré de l'unité utilisée pour mesurer la longueur de la ligne d'échantillonnage, L. Un facteur de conversion peut être nécessaire. Par exemple, lorsque L est mesurée en mètres et qu'on veut obtenir une longueur par hectare, le membre de droite de l'équation 8 doit être multiplié par 10 000. La multiplication de Y par la surface échantillonnée nous donne alors la longueur totale du réseau ou de l'élément sur la surface totale. Peu importe que les éléments coupés par le plan d'intersection soient droits ou courbes.

La possibilité d'une orientation non aléatoire des éléments doit être prise en considération, comme pour l'évaluation d'un volume de bois. Ainsi que nous l'avons vu précédemment, la méthode la plus simple consiste à prendre au moins trois axes d'échantillonnage séparés par des angles égaux. Il faut également tenir compte de la pente du sol (voir section IV). A part ces deux points, il n'y a pas d'autre source d'erreur dans cette application. Si les éléments sont visibles d'avion, les travaux peuvent naturellement être exécutés à partir de photographies.

VIII. Distribution de la longueur des pièces

Le résultat de l'échantillonnage linéaire standard (équations 1, 2, 3) est obtenu indépendamment de la longueur des pièces de l'échantillon et ne donne aucun renseignement sur la longueur des pièces, ni sur leur distribution. La formule simple (équation 8) de la section précédente donne la longueur totale des pièces par unité de surface, mais elle ne nous dit rien du nombre des pièces, ni de leur longueur. Si l'on veut obtenir un résultat qui indique la distribution de la longueur des pièces, il faut alors mesurer la longueur des pièces de l'échantillonnage (ou d'un sous-échantillon). Le décompte de l'échantillonnage peut alors être utilisé pour obtenir la distribution des longueurs.

Il faut commencer par choisir des catégories de longueurs. La distribution des longueurs sera alors sans doute exprimée sous forme du nombre des pièces par catégorie de longueur et par unité de surface échantillonnée. Un problème d'ajustement de la fréquence des longueurs décomptées se pose, car la probabilité de couper une pièce avec le plan d'intersection est naturellement proportionnelle à la longueur de la pièce. Les pièces les plus longues occuperont donc une place disproportionnée dans le décompte. Le problème a été décrit et traité par Bailey et Lefebvre (1971) qui nous donnent la réponse suivante: "La distorsion des fréquences des catégories (de longueurs) est éliminée en utilisant la longueur des pièces comme facteur de pondération (inverse)." (Si l'on consulte la publication de Bailey et Lefebvre, il faut noter que les membres des figures 1 et 2 ont été intervertis; les légendes restent les mêmes.)

Le nombre des pièces par unité de

surface dans la catégorie de longueur i peut être calculé à partir de la longueur totale des pièces Y (voir équation 8), comme suit:

$$N_i = (Y/l_i)\ (n_i/n) \qquad (9)$$

où N_i est le nombre de pièces par unité de surface dans la catégorie de longueur i,

n_i est le nombre des intersections décomptées dans la catégorie de longueur i,

l_i est le point médian ou la longueur moyenne de la catégorie de longueur i,

n est (comme précédemment) le nombre total des intersections.

Cette équation peut se simplifier en remplaçant Y d'après l'équation 8:

$$N = (\pi n_i)/(2L\ l_i) \qquad (10)$$

où L est (comme précédemment) la longueur de la ligne d'échantillonnage. Le facteur de pondération inverse mentionné ci-dessus apparaît sous la forme l_i dans les deux équations ci-dessus. Comme à la section VII, il faut parfois utiliser un facteur de conversion pour l'unité de surface choisie. Le nombre total des pièces par unité de surface (N) est alors simplement ΣN_i.

Pour obtenir des renseignements complets, il peut être nécessaire de stratifier l'échantillon par catégories de diamètres, en plus des catégories de longueurs. La méthode ci-dessus peut alors être répétée pour chaque catégorie de diamètre.

IX. Taille et précision de l'échantillon

La validité de l'échantillonnage linéaire est garantie essentiellement par la théorie de base, avec cette seule réserve qu'il faut neutraliser les distorsions potentielles, à savoir (1) orientation non aléatoire des pièces, (2) inclinaison des pièces, (3) sections non circulaires et (4) distorsions de distribution dans les catégories de diamètres. Ces erreurs systématiques ont été traitées dans les sections précédentes.

Comme dans toutes les méthodes d'échantillonnage, la précision du résultat dépend cependant de la taille de l'échantillon et de la variabilité de la population. Pour être digne de foi, le résultat de l'échantillonnage linéaire doit être accompagné d'une mesure de sa précision. La mesure la plus pratique et la plus significative est sans doute celle de l'erreur type, c'est-à-dire l'écart type des volumes estimatifs possibles par rapport à la valeur vraie. Cette erreur peut être exprimée quantitativement ou en pourcentage du résultat, selon l'utilisation qui sera faite des données.

Le principe de l'erreur type dans la méthode de l'échantillonnage linéaire n'est cependant pas tout à fait évident. Il en est ainsi du fait que la méthode mesure un attribut de surface plutôt qu'une propriété d'une population composée d'unités discrètes, par exemple un ensemble de diamètres d'arbres. Dans la méthode de l'échantillonnage linéaire, l'échantillon total est évidemment la longueur totale de la ligne échantillonnée, mais il n'y a pas d'unités discrètes identifiables. Les intersections des différentes pièces ne répondent pas à cette condition, puisqu'elles ne sont pas associées à une surface de sol identifiable. Cette difficulté, un peu obscure peut-être, se résoud facilement en divisant l'échantillon total en sections et en calculant l'erreur type du résultat moyen. La question qui se pose est de choisir la meilleure méthode pour y parvenir.

De Vries (1973) a analysé en profondeur les aspects mathématiques de la méthode d'échantillonnage linéaire, y compris une évaluation de sa précision. Pickford et Hazard (1978) ont communiqué les résultats d'études exhaustives de simulation où nous trouvons plusieurs conclusions portant sur la question de la précision. D'après ces expériences et d'autres, nous pouvons établir les principes suivants:

1. Dans une situation donnée, le degré de précision dépend principalement de la dimension totale de l'échantillon.
2. Théoriquement, la dimension de la zone échantillonnée n'a pas d'importance; c'est la variabilité de la population échantillonnée qui compte.
3. Il en résulte que pour une longueur

totale d'échantillonnage donnée, le nombre des sections n'a pas d'importance, dans certaines limites. Par exemple, 10 sections de 100 m chacune devraient donner la même erreur type que 100 sections de 10 m chacune.

4. Les sections peuvent être séparées ou elles peuvent faire partie d'une seule ligne continue.
5. La précision est également liée à la concentration, c'est-à-dire au nombre d'intersections par unité de longueur de la ligne d'échantillonnage. Donc, plus la catégorie de diamètre est étroite, plus les pièces sont nombreuses et plus la ligne d'échantillonnage peut être courte pour obtenir une même précision. Brown (1974) et McCrae et al. (1979) indiquent que, pour obtenir une efficacité maximale, seule la catégorie du plus gros diamètre doit être décomptée sur la totalité de chaque ligne d'échantillonnage ou de chaque côté du triangle; la proportion de la ligne utilisée pour chaque catégorie décroît avec le diamètre.

Ces principes appellent quelques observations d'ordre pratique. Si la taille totale de l'échantillon (point 2) ne dépend théoriquement pas de la superficie à échantillonner, il peut cependant sembler irréaliste de trop éparpiller les unités d'échantillonnage sur une grande surface. De façon générale, pour que les résultats soient dignes de foi, McCrae et al. (1979) recommandent d'utiliser au moins un triangle équilatéral de 30 m de côté pour chaque surface d'échantillonnage de 20 hectares.

En ce qui concerne le nombre minimum de sections pour un échantillon total donné (point 3), la bibliographie ne donne pas d'indications très claires sur le théorie qui s'applique. Les résultats de quelques simulations empiriques exécutées à l'Institut nous font croire que le nombre des sections ne devrait pas être réduit au-dessous d'un certain minimum, faute de quoi une instabilité de l'erreur type risque de se produire. En d'autres termes, la probabilité d'obtenir une erreur type proche de l'erreur type réelle risque de diminuer. Tant que cette question n'aura pas été réglée, il semble raisonnable d'avancer que l'erreur type doit être basée sur au moins 10 et de préférence 20 sections. Il pourra s'agir de lignes individuelles ou de sections de lignes ou encore de côtés de triangles équilatéraux. Pour plus de précision, rappelons que cette considération ne s'applique qu'au nombre minimum de sections dans un échantillon total donné, ce qui revient à dire que si le nombre des sections est réduit de moitié, leur longueur individuelle est doublée. A part cette limitation possible du nombre minimum de sections, comme le disent Pickford et Hazard (1978), "le produit du nombre des lignes par la longueur des lignes est approximativement constant pour les niveaux spécifiés de précision." (Voir le tableau 12 et la figure 1 de ces auteurs).

Un aspect pratique de la variabilité (points 3 et 4) est son ampleur. A un extrême, la variabilité est absorbée dans les sections individuelles de l'échantillon total. Par contre, quand des densités anormales de pièces apparaissent en des points suffisamment grands, ils peuvent dominer les sections des échantillons individuels ou même perturber deux ou plusieurs sections voisines. Quand le phénomène se produit, un principe important de l'échantillonnage aléatoire est violé, à savoir que chaque unité d'échantillon doit être indépendante des autres. A mesure que l'importance des points anormaux augmente, une stratification complète en évaluations indépendantes peut être indiquée. Il s'agit ici encore d'une question de jugement, selon l'utilisation qui sera faite des résultats. Une bonne évaluation du comportement du feu peut nécessiter une stratification de la zone en fonction de la densité, alors que ce ne sera pas nécessairement le cas si l'on évalue les résidus d'abattage utilisables.

Les différents éléments qui ont une incidence sur la dimension et le nombre des sections individuelles fait conclure à la nécessité d'une certaine souplesse. Par exemple, si une configuration type entraîne une absence manifeste d'indépendance entre les sections, celles-ci peuvent être allongées ou écartées davantage. Si

les côtés des triangles équilatéraux ne semblent pas suffisamment indépendants, le triangle peut être agrandi ou encore la totalité du triangle peut être considérée comme une unité sur le plan statistique.

Le point de départ pour choisir la longueur de l'échantillon total est le degré voulu de précision. Ensuite, si l'on ne connaît pas approximativement la variabilité de la population, il peut être nécessaire d'exécuter un essai préliminaire d'uniformité pour l'évaluer provisoirement. Le choix du degré de précision a une importance critique, car le carré de la taille de l'échantillon est inversement proportionnel à l'erreur admissible, un principe d'échantillonnage universel que Pickford et Hazard (1978, tableau 12) ont bien illustré dans le cas de la méthode d'échantillonnage linéaire. Pour doubler la précision (c'est-à-dire pour réduire de moitié l'erreur type admissible), il faut donc quadrupler l'échantillon.

Le choix du degré de précision ne doit être fait qu'après une analyse objective de la valeur de l'évaluation du volume à laquelle on procède, car une précision inutile est naturellement coûteuse. Il est également intéressant de noter que lorsque des lignes ou des triangles d'échantillonnage individuels sont disposés sur un réseau de grille, le degré de précision semble généralement un peu meilleur (dans une mesure indéterminée) que dans le cas d'un échantillonnage semblable agencé de façon aléatoire. Une erreur type de ±10 pour cent du résultat suffit probablement pour toutes les utilisations prévues et une erreur de ±20 pour cent pour un grand nombre d'applications. (Une expression quantitative de l'erreur type peut être préférable).

L'erreur type du volume évalué par échantillonnage linéaire peut être calculée comme suit (d'après les manuels courants de statistique):

$$s_{\bar{x}} = s/\sqrt{n} \qquad (11)$$

où $s_{\bar{x}}$ est l'erreur type en unités de volume/unité de surface,

n est le nombre de sections de l'échantillon total, et

s est l'écart type donné par

$$s = \left[\frac{\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2/n}{n-1}\right]^{1/2} \qquad (12)$$

où X est le volume des sections individuelles. Une correction de petite population n'est pas nécessaire ici, le nombre potentiel des lignes d'échantillonnage sur une surface quelconque pouvant être considéré comme infini. La probabilité que le volume moyen vrai par unité de surface se situe dans la plage $\bar{X} \pm s_{\bar{x}}$ est de 67 pour cent, $\bar{X}$ étant la moyenne des différents Xs. Les limites de confiance de 95 pour cent, utilisées par Pickford et Hazard (1978), constituent une plage d'environ $\bar{X} \pm 2\, s_{\bar{x}}$.

X. Nom de la méthode

Nous avons appelé ici cette méthode la "méthode de l'échantillonnage linéaire" (line intersect method), d'après la publication originale de Warren et Olsen (1964) sur la mesure des résidus d'abattage. Ce nom a été repris par tous les auteurs qui s'intéressent à cette application. Van Wagner (1968) a utilisé le même nom pour les mesures de combustibles forestiers. Il faut naturellement comprendre que la ligne d'échantillonnage de cette méthode est en fait un plan vertical qui s'élève au-dessus du sol, aussi haut qu'il est nécessaire pour comprendre toutes les pièces en contact direct ou indirect avec le sol. Brown (1971) a mis au point une variante de ce principe, dans laquelle les plans d'échantillonnage peuvent être orientés au besoin selon des angles autres que la verticale. Il appelle cette méthode "méthode du plan d'intersection" (planar intersect method). Il a ensuite repris cette méthode dans son Handbook for Inventorying Downed Woody Material (Brown 1974) qui a été très largement utilisé pour la mesure des combustibles forestiers, particulièrement aux États-Unis. On peut se demander quelle est la différence, s'il y en a, entre la méthode de l'échantillonnage linéaire et la méthode du plan d'échantillonnage.

Les principaux critères pour distinguer les méthodes d'évaluation sur le terrain devraient normalement être les

suivants: (a) la théorie et l'équation de base, (b) les renseignements recueillis, et (c) les règles utilisées pour le décompte. Si nous utilisons ces critères, nous voyons que ces deux méthodes sont en fait identiques tant que la méthode du plan d'échantillonnage n'est appliquée qu'à des plans verticaux. Dans le manuel de Brown (1974), l'échantillonnage est en fait exécuté avec des plans verticaux. Nous n'avons aucunement l'intention de demander à quiconque de changer le nom dont il désigne sa méthode, mais il est utile que les utilisateurs sachent que la méthode d'échantillonnage linéaire et la méthode du plan d'échantillonnage sont identiques lorsqu'il s'agit de mesurer les volumes de bois se trouvant au sol.

La configuration utilisée sur le terrain consiste simplement à choisir la longueur et le nombre des lignes, ainsi que leur agencement au sol. Une infinité de solutions sont donc possibles et c'est à l'observateur de les choisir en fonction de son jugement et de son expérience.

XI. Choix du diamètre

La méthode de l'échantillonnage linéaire peut être considérée comme consistant à utiliser un échantillon en bande d'une largeur infinitésimale (voir section I) dans lequel on mesure le diamètre au point d'intersection. On peut aussi l'utiliser pour choisir des pièces dont le diamètre sera mesuré soit au point médian, soit aux deux extrémités. Le volume des pièces serait alors calculé au moyen des formules Huber ou Smalian. Plusieurs auteurs (par exemple Bailey 1970, Ménard et Dionne 1972) ont utilisé la formule Smalian avec les diamètres aux deux extrémités pour transformer leurs estimations des résidus forestiers en volumes standard de rondins. De Vries (1973) a fondé une partie de son analyse sur les diamètres au point médian et sur la formule de volume de Huber. Ce qu'il faut retenir ici est que les formules Huber et Smalian sont exemptes de distorsion uniquement si les pièces sont des cylindres ou des paraboloïdes. Il en résulte que la mesure du diamètre au point d'intersection donne la seule estimation du volume par unité de surface qui ne soit pas sujette à une distorsion si les pièces ne correspondent pas à ces formes (Van Wagner et Wilson, 1976). Un échantillonnage linéaire basé sur les diamètres aux intersections et conçu de manière à éliminer les distorsions potentielles dont nous avons déjà parlé constitue donc la norme pour les méthodes de volume total, lorsque les pièces sont laissées sur place. Une meilleure norme de base ne serait possible qu'en utilisant une méthode qui consisterait à déterminer le volume de toutes les pièces en les plongeant dans un réservoir d'eau étalonné. De plus, non seulement le volume déterminé à partir des diamètres aux intersections est exempt de toute distorsion due à la forme, mais l'expérience montre aussi que les diamètres aux intersections sont de loin les plus rapides à obtenir (Bailey 1970, Howard et Ward 1972, Ménard et Dionne 1972, Van Wagner et Wilson 1976). On peut donc étudier ainsi un échantillon beaucoup plus grand pour un effort de même ordre de grandeur. Pour les applications spéciales, par exemple l'évaluation de la distribution des longueurs ou de la pourriture aux extrémités, il peut être nécessaire d'étudier les extrémités de certaines des pièces décomptées.

Conclusion

Le principe théorique de la méthode de l'échantillonnage linéaire est simple (voir équation 1), mais de nombreuses questions pratiques se posent lorsqu'on l'applique. Certaines portent sur les sources potentielles de distorsion ou d'erreur, d'autres sur l'efficacité de la configuration utilisée sur le terrain et sur la précision des résultats. Les sources potentielles d'erreur sont les suivantes:

1. Orientation non aléatoire des pièces (section III)
2. Inclinaison des pièces par rapport à l'horizontale (section IV)
3. Sections non circulaires (section V)
4. Lorsque les diamètres sont classés en catégories, distribution non uniforme des diamètres dans les catégories (section VI)

Si ces erreurs sont neutralisées ou s'il en est tenu compte, la méthode d'échantillonnage linéaire donne un résultat valide que peut être utilisé comme norme de référence pour les méthodes de mesure des quantités de bois au sol.

Les autres questions pratiques qui se posent sont les suivantes:

1. Configuration utilisée sur le terrain (section III)
2. Pente du terrain (section IV)
3. Limite des catégories de diamètres (section VI)
4. Taille de l'échantillon et précision (section IX)

La précision du résultat final dépend essentiellement de la longueur totale des lignes d'échantillonnage, mais aussi de la structure des catégories de diamètres utilisées pour le décompte. Lorsqu'on désire obtenir un volume total, les grosses pièces doivent être mesurées avec précision ou il faut utiliser des catégories étroites.

Avec la méthode de l'échantillonnage linéaire, il suffit de compter les intersections pour déterminer la longueur totale des pièces ou des réseaux de la zone échantillonnée (section VII). En comptant les longueurs des pièces coupées (ou un sous-échantillon de ces pièces), on peut aussi l'utiliser pour établir la distribution de la longueur des pièces en fonction du nombre de pièces par catégorie de longueur et de diamètre pour une unité de la surface échantillonnée (section VIII).

En fin de compte, on peut conclure qu'un relevé d'échantillonnage linéaire bien conçu en fonction d'un niveau donné de précision constitue la méthode la plus rapide et la plus sûre pour mesurer les quantités de bois se trouvant au sol.

Bibliographie

Bailey, G.R. 1970. A simplified method of sampling logging residue. For. Chron. 46:288–294.

Bailey, G.R., and E.L. Lefebvre. 1971. Estimating volume distributions of logging residue from intersect-sampled data. Bi-Mon. Res. Notes 27:4–5.

Bevins, C.D. 1978. Fuel particle diameters of western hemlock slash. USDA For. Serv. Res. Note INT-243, 3 pp.

Brown, J.K. 1971. A planar intersect method for sampling fuel volume and surface area. For. Sci. 17:96–102.

Brown, J.K. 1974. Handbook for inventorying downed woody material. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-16. 24 pp.

Brown, J.K., and P.J. Roussopoulos. 1974. Eliminating biases in the planar intersect method for estimating volumes of small fuels. For. Sci. 20:350–356.

de Vries, P.G. 1973. A general theory on line intersect sampling with application to logging residue inventory. Med. Landbouw Hogeschool 73-11, Wageningen, 23 pp.

Hildebrandt, G. 1973. The use of photo line sampling for estimation of total length of linear objects. In Proc. Symp. IUFRO Subj. Group 5.6.05, Freiburg, pp. 267–284.

Howard, J.O., and F.R. Ward. 1972. Measurement of logging residue—alternative applications of the line intersect method. USDA For. Serv. Res. Note PNW-183, 8 pp.

Matern, B. 1964. A method of estimating the total length of roads by means of a line survey. Stud. For. Suedica 18:68–70.

McRae, D.J., M.E. Alexander, and B.J. Stocks. 1979. Measurement and description of fuels and fire behavior on prescribed burns: A handbook. Can. For. Serv. Rep. O-X-287, Great Lakes For. Res. Cent., 56 pp.

Ménard, M., and J. Dionne. 1972. Essai d'une méthode par transects pour estimer le volume de bois non utilisé lors d'une exploitation forestière. Ministère des terres et forêts, Québec, Serv. de la

recherche, Note 2(1972), 9 pp.

Pickford, S.G., and J.W. Hazard. 1978. Simulation studies on line intersect sampling of forest residue. For. Sci. 24:469–483.

Sackett, S.S. 1980. Woody fuel particle size and specific gravity of southwestern tree species. U.S. For. Serv. Res. Note RM-389, Rocky Mt. For. and Range Exp. Sta., 4 pp.

Van Wagner, C.E. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. For. Sci. 14:20–26.

Van Wagner, C.E., and A.L. Wilson. 1976. Diameter measurement in the line intersect method. For. Sci. 22:230–232.

Warren, W.G., and P.F. Olsen. 1964. A line intersect technique for assessing logging waste. For. Sci. 10:267–276.